

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Теоретичні основи теплотехніки

Визначення ізобарної теплоємності газів

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи
з дисципліни

Київ
«Політехніка»
2010

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

В. І. Дешко, В.В. Дубровська, Г.Г. Стрелкова

Визначення ізобарної теплоємності повітря

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи

з дисципліни
«Теоретичні основи теплотехніки»
для студентів
інженерно-технічних спеціальностей

Київ 2010

Визначення ізобарної теплоємності газів: Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи для студентів інженерно-технічних спеціальностей/ Укл. В.І.Дешко, В.В.Дубровська, Г.Г. Стрелкова. - К.: НТУУ «КПІ», 2010. - 18 с.

*Гриф надано Методичною радою НТУУ „КПІ”
(Протокол № від)*

На в ч а л ь н е в и д а н н я

Визначення ізобарної теплоємності газів

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи

з дисципліни

«Теоретичні основи теплотехніки»

для студентів інженерно-технічних спеціальностей

Укладачі: *Дешко Валерій Іванович, д.т.н, проф.*

Дубровська Вікторія Василівна, к.т.н, доцент

Стрелкова Галина Георгіївна, к. ф.-м. н., доцент

Відповідальний редактор: *Шкляр Віктор Іванович, к.т.н., доцент*

Рецензент: *Васильченко Геннадій Миколайович, к.т.н., доцент*

Зміст

Вступ	4
1. Мета та основні завдання роботи	4
2. Основні теоретичні відомості	4
3. Опис експериментальної установки	7
4. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи	9
5. Порядок і рекомендації щодо виконання лабораторної роботи	9
6. Обробка експериментальних даних	10
7. Оцінка похибки експериментальних даних	15
8. Звіт по роботі	16
9. Контрольні запитання	16
Література	17

Вступ

Визначення кількості теплоти, яке робоче тіло отримує чи віддає в процесі нагрівання або охолодження, нерозривно пов'язано з поняттям теплоємності.

Експериментальне дослідження теплоємності речовин дозволяє не тільки отримати найбільш надійні дані по теплоємності, але і розрахувати на їх підставі інші термодинамічні властивості речовин, перш за все внутрішню енергію та ентальпію.

1 МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Мета роботи – закріпити знання отриманні в процесі вивчення дисципліни, засвоїти методи експериментального визначення й практичного використання теплоємності газів на прикладі повітря.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Теплоємність чисельно дорівнює кількості теплоти, яку треба передати тілу для того, щоб в даному процесі за певних сталих параметрів змінити його температуру на 1 К.

Якщо теплоємність віднесена до якої-небудь кількісної одиниці речовини, то її називають питомою. Розрізняють питомі теплоємності: масову теплоємність c [кДж/(кг·К)], об'ємну теплоємність c' [кДж/(м³·К)] та молярну теплоємність c_μ [кДж/(кмоль К)].

Питомі теплоємності пов'язані між собою співвідношенням:

$$c = c' \cdot v_n = \frac{c_\mu}{\mu}, \quad (1)$$

де v_n - питомий об'єм газу за нормальних умов, м³_н/кг;

μ - молярна маса речовини, кг/кмоль.

Таким чином, питома теплоємність тіла залежить від кількісної одиниці, до якої її відносять, від природи тіла, характеру процесу зміни стану та параметрів стану тіла. Це означає, що для газу теплоємність може розглядатися в даному процесі як функція температури й тиску.

Теплоємність ідеального газу не залежить від тиску, для багатьох реальних газів на віддалені від стану насичення (за умов, близьких до нормальних) вона також вважається тільки функцією температури.

Теплоємність газу при заданій температурі (інтервал зміни температури нескінченно малий) називається істинною:

$$c = \frac{\delta q}{\delta T} = \frac{\delta q}{\delta t}, \quad (2)$$

а теплоємність в інтервалі температур $T_1 \dots T_2$ або $t_1 \dots t_2$ – середньою:

$$\bar{c} = \frac{q}{T_2 - T_1} = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (3)$$

Кожний газ, як це випливає з математичного виразу першого закону термодинаміки, залежно від характеру процесу має нескінченну кількість числових значень теплоємності. При термодинамічному аналізі і теплотехнічних розрахунках особливе місце посідають теплоємності в процесах при постійному об'ємі c_v та при постійному тиску c_p . Для ідеального газу значень цих теплоємностей достатньо для визначення внутрішньої енергії та ентальпії газу як функції температури.

Універсальні співвідношення, які встановлюють зв'язок c_v і c_p між собою та основними параметрами стану, можна одержати за допомогою диференціальних рівнянь термодинаміки. Для кожного конкретного газу повинна бути також відома форма рівняння стану:

$$F(p, v, t) = 0. \quad (4)$$

Наприклад, для певного ідеального газу зв'язок c_v і c_p встановлюється у формі закону Майєра:

$$c_p - c_v = R, \quad (5)$$

де R - газова стала цього газу, $R = R_\mu / \mu$; $R_\mu = 8314$ (Дж/(кмоль·К) – універсальна газова стала; μ - маса кмоля газу, кг/кмоль.

При теплотехнічних розрахунках значення теплоємності різноманітних речовин, в тому числі і газів, визначається за таблицями теплофізичних властивостей в залежності від тиску та температури.

Значення c_v і c_p для ідеальних газів дозволяє обчислити молекулярно-кінетична теорія, точніше вони визначаються спектроскопічними методами, заснованими на застосуванні квантової фізики.

Теплоємність найбільш важливих газів визначається експериментально. Середню ізобарну теплоємність c_p майже завжди визначають методом проточного калориметрування. Через проточний калориметр пропускають газ, який нагрівається розміщеним усередині електронагрівачем. У стаціонарному режимі вимірюють кількість теплоти, яка передається газу від нагрівача, температури газу на вході й виході калориметра, а також витрату газу.

Теплоємність розраховують на основі рівняння першого закону термодинаміки для потоку, записаного для вхідного й вихідного перерізів калориметра:

$$q = q_{\text{ел}} + q_{\text{т.в.}} = h_2 - h_1 + \frac{W_2^2}{2} - \frac{W_1^2}{2} + l_T + g(Z_2 - Z_1). \quad (6)$$

У цьому рівнянні q - кількість теплоти підведена до газу в калориметрі; $q_{\text{ел}}$ - кількість теплоти отримана від нагрівача; $q_{\text{т.в.}}$ - теплові втрати калориметра в навколишнє середовище.

Різниця між швидкостями W_2 і W_1 та висотами Z_2 і Z_1 малі, технічна робота l_T не виконується. Теплові втрати в калориметрі самовловлюються, для адіабатного калориметра $q_{\text{т.в.}} = 0$.

У лабораторній роботі визначається теплоємність повітря, яке в умовах експерименту (при атмосферному тиску і температурі, близькій до кімнатної) за своїми властивостями наближене до ідеального газу.

Тоді, підставляючи (3) у (6) з урахуванням попередніх припущень, одержимо:

$$q = q_{\text{ел}} = h_2 - h_1 = \bar{c}_p \cdot (T_2 - T_1). \quad (7)$$

Оскільки $q_{\text{ел}}$ пов'язано з електричною потужністю нагрівача і масовою витратою газу через калориметр, то:

$$q_{\text{ел}} = \frac{W_{\text{ел}}}{m}. \quad (8)$$

Об'єднуючи (8) і (7), дістанемо формулу для визначення середньої ізобарної теплоємності в проточному адіабатному калориметрі:

$$\bar{c}_p = \frac{W}{m \cdot \Delta T}. \quad (9)$$

3 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Основним елементом установки, зображеної на рис. 1, є скляний проточний калориметр 6. Калориметричний нагрівач 7, зроблений з ніхромової спіралі опором близько 90 Ом, розташований по осі калориметра. Потік холодного повітря із зовнішніх каналів прямує до нагрівача, самовловлюючи теплові втрати з центральної нагрітої зони калориметра.

Температури повітря на вході й виході з калориметра t_1 і t_2 вимірюються хромель-алюмелевими термопарами. Термопари підключені до багатоканального цифрового приладу для вимірювання температури 11 типу А-565. Температури t_1 і t_2 , відповідно на вході й виході у калориметр, висвітлюються на табло приладу в градусах Цельсія при натисканні клавіш відповідного каналу.

Повітря нагрівається практично при постійному тиску, а потік повітря в каналах забезпечує уловлення теплових втрат і створює в зовнішній скляній трубці адіабатні умови по відношенню до навколишнього середовища.

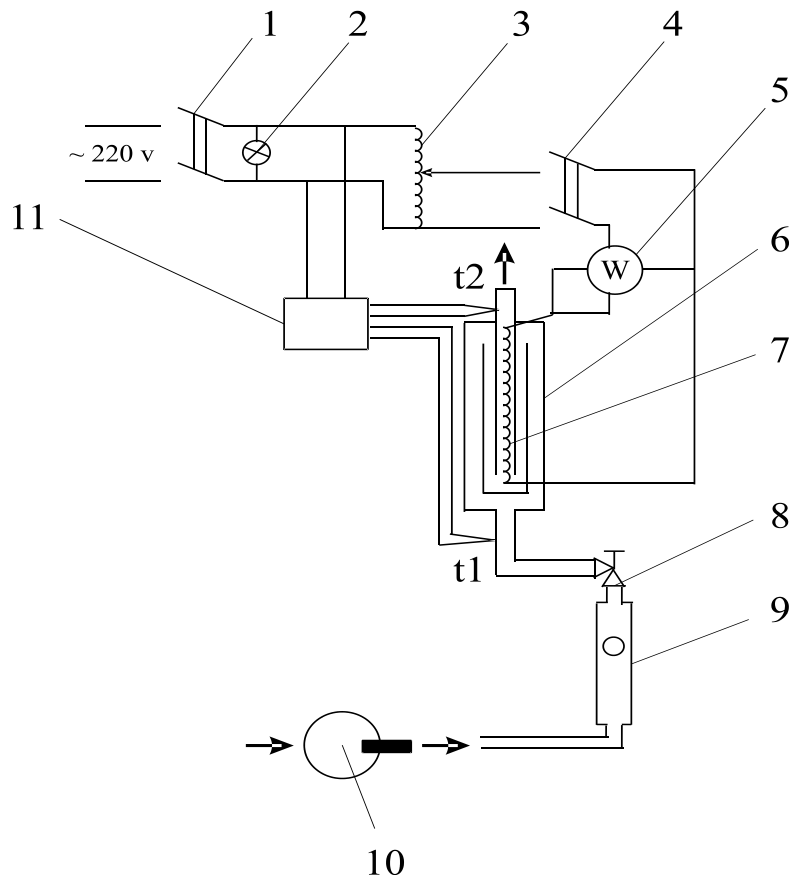


Рис. 1 Схема експериментальної установки:

1,4 – вимикачі; 2 – лампочка; 3 – автотрансформатор; 5 – ватметр; 6 – електрокалориметр; 7 – калориметричний нагрівач; 8 – голковий клапан; 9 – ротаметр; 10 – вентилятор; 11 – показуючий цифровий прилад.

Повітря подається вентилятором 10. Витрата газу регулюється голковим клапаном 8. Об'ємна витрата визначається за показами ротаметра 9 та за допомогою градуовального графіка.

Електрична потужність нагрівача 7 регулюється лабораторним автотрансформатором ЛАТР 3 та вимірюється ватметром 5.

Тиск газу в калориметрі визначається за показами барометра у приміщенні лабораторії.

4 ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. До виконання лабораторної роботи на установці допускаються лише ті студенти, що вивчили методичні вказівки та правила безпеки, підготували протокол до лабораторної роботи.
2. Дослідження проводиться лише під наглядом викладача.
3. Забороняється самостійно перемикає діпазони ватметра і змінювати режим роботи ЛАТРа.
4. У разі виникнення найменших неполадок необхідно терміново повідомити про це викладача.

5 ПОРЯДОК І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

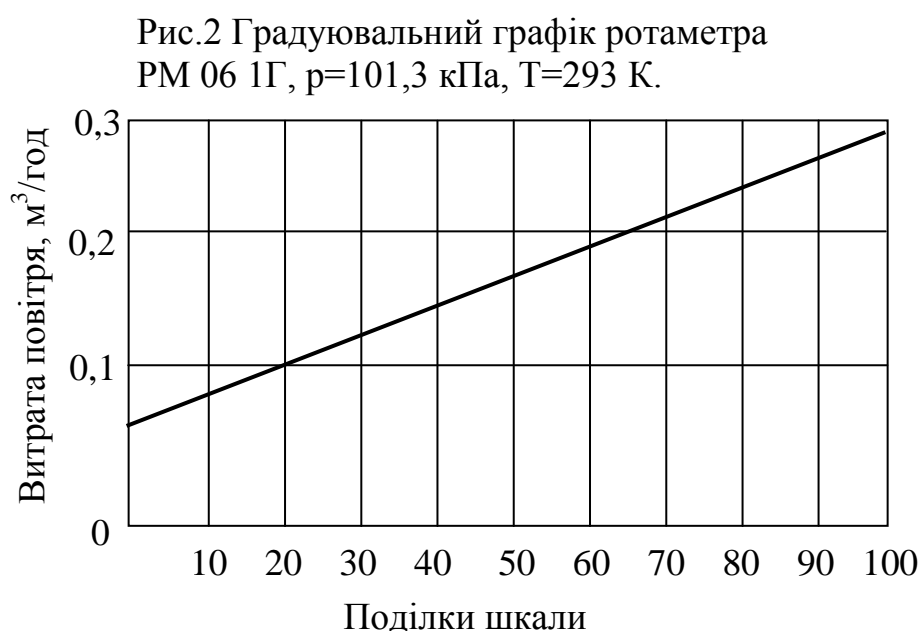
При проведенні лабораторної роботи вимикачем 1 подати напругу на лабораторний стенд. При цьому вмикається лампочка 2. Клапаном 8 ротаметра 9 встановити і підтримувати потрібну витрату газу. Значення витрати визначають за шкалою ротаметра по верхній точці кульки-поплавця. Вимикачем 4 підключити автотрансформатор 3 до калориметра. За допомогою рукоятки автотрансформатора встановити необхідне значення потужності на нагрівачі 7. Значення потужності контролюється ватметром(5).

Вихід установки на стаціонарний режим визначити за температурою t_2 повітря після калориметра, для чого значення t_2 з інтервалом в 3 хв. зафіксувати й занести в окрему таблицю. Коли значення t_2 стане постійним, визначити покази ватметра, ротаметра, барометра, температури t_1 і t_2 за приладом А-565 та занести їх у табл. 1. Для контролю за стабільністю параметрів і визначення похибки вимірювання у зазначеній послідовності провести кілька разів.

Після узгодження з викладачем одержаних результатів калориметричні досліди провести 2-3 рази для інших режимів. Рекомендовані значення витрати повітря дорівнюють 70, 90 поділок за шкалою ротаметра і відповідно потужності - 1,5; 2; 2,5; 3 Вт. Температура повітря на виході з калориметра при цьому не повинна перевищувати 60 °С, що забезпечує для даної конструкції калориметра досить ефективну реалізацію самовловлювання теплових втрат.

6 ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

За експериментальними значеннями об'ємної витрати газу в поділках шкали ротаметра необхідно визначити об'ємну витрату газу V (м³/год) за градувальним графіком ротаметра при параметрах p , T градування, наведених на рис. 2. Ці дані занести в табл.1.



Поділки шкали	Витрата повітря, м ³ /год
0	0,055
10	0,075
20	
30	
40	0,142
50	
60	0,179
70	
80	0,224
90	
100	0,267

Результати вимірювання у кожному досліді усереднити, та за допомогою формули (9) обчислити відповідні значення середньої масової ізобарної теплоємності газу, віднесені до температури $\bar{T} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2) + 273,15$.

Результати спостережень

Таблиця 1

Номер досліджу	Номер запису показів	Потужність електро-нагрівача W , Вт	Температура газу, $^{\circ}\text{C}$		Об'ємна витрата газу		Барометричний тиск, $p_{\text{БАР}}$, кПа.	Підпис викладача
			На Вхіді t_1	На виході t_2	у поділках шкали ротаметра	За грабуювальним графіком V , $\text{м}^3/\text{год.}$		
1	1 2 3 4							
Середнє								
2	1 2 3 4							
Середнє								
3	1 2 3 4							
Середнє								

Результати розрахунку

Таблиця 2

Номер дослідду	v , $\text{м}^3/\text{кг}$	V , $\text{м}^3/\text{год}$	T , К	c_p	c_p^T	$c_p^{\text{МК}}$	$\delta^T(c_p)$ %	c_v $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
				$\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$				

h_2 , $\text{кДж}/\text{кг}$	h_2^T , $\text{кДж}/\text{кг}$	$\delta^T(h)$ %	u_2 , $\text{кДж}/\text{кг}$	u_2^T , $\text{кДж}/\text{кг}$	$\delta^T(u)$ %	s_2 , $\text{кДж}/\text{кг}$	s_2^T , $\text{кДж}/\text{кг}$	$\delta^T(s)$ %

Гази	μc_v	μc_p	μc_v	μc_p
	кДж/(кмоль · К)		ккал/(кмоль · К)	
Одноатомні	12,56	20,93	3	5
Двоатомні	20,93	29,31	5	7
Трьох- та багатоатомні	28,31	37,68	7	9

Необхідні при цьому значення масової витрати газу m , (кг/с), визначити за формулою:

$$m = \frac{V_1}{v_1 \cdot 3600}, \quad (10)$$

де значення питомого об'єму v_1 та об'ємної витрати газу V_1 відповідають параметрам на вході в калориметр $T_1 = t_1 + 273,15$; $p_1 = p_{\text{бар}}$.

Об'ємна витрата повітря V_1 при температурі на вході в калориметр T_1 визначається за формулою:

$$V_1 = V \cdot \sqrt{\frac{v_1}{v}}, \text{ м}^3/\text{ГОД}. \quad (11)$$

З рівняння стану ідеального газу

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (12)$$

визначають:

1) питомий об'єм повітря v_1 при температурі на вході в калориметр T_1 (К) і тиску $p_1 = p_{\text{бар}}$, (Па):

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (13)$$

де газова стала для повітря дорівнює: $R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{29} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, молярна

маса повітря $\mu = 29$ кг/кмоль;

2) питомий об'єм повітря v при параметрах градування ротаметра: температурі $T=293\text{ К}$ і тиску $p=101325\text{ Па}$.

Одержані для кожного досліду значення $v_1, V_1, \bar{T}, \bar{c}_p$ необхідно занести в табл. 2. При цьому значення \bar{c}_p необхідно усереднити та порівняти з табличними c_p^T (табл. 4) за тієї самої температури \bar{T} , або в тому ж інтервалі $T_1 \dots T_2$, а також порівняти з c_p^{MK} , що розрахована за молекулярно-кінетичною теорією. Для цього використовуємо значення $\mu\tilde{n}_0^3 \mu\tilde{n}_v$ з таблиці 3 і формулу (1).

Термодинамічні властивості повітря

Таблиця 4

$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{К}$	c_p	c_v	h	u	s^0
		кДж/(кг·К)		кДж/кг		кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7
ПОВІТРЯ						
0	273,15	1,0028	0,7158	273,32	194,90	6,6103
10	283,15			283,35	202,06	6,6464
20	293,15			293,39	209,23	6,6812
25	298,15	1,0038	0,7168			
30	303,15			303,43	216,40	6,7149
40	313,15			313,48	223,57	6,7475
50	323,15	1,0053	0,7183	323,53	230,75	6,7791
60	333,15			333,59	237,94	6,8098
70	343,15			343,66	245,14	6,8396
75	348,15	1,0073	0,7203			
80	353,15			353,73	252,35	6,8685
90	363,15			363,82	259,56	6,8967
100	373,15	1,0098	0,7228	373,92	266,79	6,9241

Потім, використовуючи середнє значення \bar{c}_p , та методи розрахунку термодинамічних властивостей ідеального газу, обчислити середню ізохорну теплоємність \bar{c}_v , питомі внутрішню енергію u_2 , ентальпію h_2 й ентропію s_2 при параметрах на виході з калориметра $p_2=p_{\text{бар}}, T_2$; порівняти їх з табличними даними u_2^T, h_2^T, s_2^T .

Беручи початкові значення термодинамічних функцій u_0, h_0, s_0^0 при нульовій температурі з табл. 4 та, вважаючи \bar{c}_p для інтервалу $0^\circ\text{C} \dots t_2$ за даними експерименту, отримаємо:

$$u_2 = u_0 + \bar{c}_v \cdot t_2; \quad (14)$$

$$h_2 = h_0 + \bar{c}_p \cdot t_2; \quad (15)$$

$$s_2 = s_0^0 + \bar{c}_p \cdot \ln \frac{T_2}{273} - R \cdot \ln \frac{p_{\text{бар}}}{p_{\text{н}}}. \quad (16)$$

Значення u_2^T, h_2^T, s_2^0 визначають за даними табл. 4, тоді:

$$s_2^T = s_2^0 - R \cdot \ln \frac{p_{\text{бар}}}{p_{\text{н}}}. \quad (17)$$

Знайдені дані заносять у табл.2.

7 ОЦІНКА ПОХИБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

В роботі визначаються відносні похибки визначених величин.

Знаходження похибки $\delta c_p, \%$ значення середньої питомої ізобарної теплоємності повітря \bar{c}_p , отримане в експерименті методом проточного калориметрування, відносно табличних значень c_p^T (див. табл. 4) виконують за формулою:

$$\delta c_p = \frac{|c_p^T - \bar{c}_p|}{c_p^T} \cdot 100\%. \quad (18)$$

- Табличне значення c_p^T визначають для середньої температури інтервалу температур T_1 та T_2 на вході і виході з калориметра: $T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2}$.
- Значення c_p^T знаходять за формулою лінійної інтерполяції, використовуючи табл.4:

$$c_p^T = c_{p \min}^T + \frac{c_{p \max}^T - c_{p \min}^T}{\Delta T} \cdot (T_{cp} - T_{\min}), \quad (19)$$

де ΔT (К) - значення температурного інтервалу, в якому знаходиться середня температура T_{cp} ;

T_{min} (К) - значення нижньої (мінімальної) границі температурного інтервалу ΔT ;

$c_{p\ min}^T$ та $c_{p\ max}^T$ - значення теплоємності, які відповідають нижній і верхній границям температурного інтервалу ΔT .

Аналогічно знаходять відносні похибки $\delta^T(u_2), \delta^T(h_2), \delta^T(s_2), \delta^T(c_v)$ у відсотках.

8 ЗВІТ ПО РОБОТІ

У звіт повинні увійти:

- принципова схема експериментальної установки і короткий опис роботи установки;
- таблиця результатів вимірювання;
- таблиця дослідних даних і результатів розрахунків калориметричних параметрів;
- відповідні розрахунки.

9 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дати визначення ідеального газу.
2. Що таке теплоємність?
3. Перерахувати види та характеристики питомих теплоємностей.
4. Записати співвідношення між питомими масовою та об'ємною, а також молярною теплоємностями.
5. Як привести об'єм газу до нормальних умов?
6. Написати й пояснити рівняння I закону термодинаміки.
7. Написати та пояснити рівняння Майєра. Фізичний зміст

універсальної та питомої газових сталих.

8. Зв'язок між об'ємними теплоємностями при постійних тиску та об'ємі.
9. Як залежить питома масова теплоємність ідеального газу від його молекулярної маси і числа атомів у його молекулі?
10. Пояснити принцип роботи експериментальної установки по визначенню теплоємності повітря.
11. Що таке сталий тепловий режим?
12. Чи враховуються в даній роботі втрати теплоти в оточуюче середовище? Чому?
13. Які чинники впливають на точність визначення теплоємності?
14. Що таке показник адіабати і від чого він залежить?
15. Дати визначення середньої і істинної теплоємності.
16. Як знайти середню теплоємність газу у заданому інтервалі температур?

Література

1. Алабовский А.Н. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник / А. Алабовский, И. Недужий – К.: Вища шк., 1990. – 255 с.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник / Нащокин В.В. – М.: Высшая шк., 1969– 559 с.
3. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К и др.. Теплотехника: учебник для вузов / под. ред. Баскакова А.П. – М.: Энергоатомиздат, 1997.– 224 с.
4. Алабовский А.Н. Теплотехника / А.Н. Алабовский, С.М. Константинов, И.А. Недужий.– К: Вища шк., 1986.– 254 с.
5. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М: Энергоиздат, 1981– 417 с.

6. Теплотехніка: підручник/ Б.Х. Драганов, А.А. Долінський, А.В. Міщенко, Є.М. Письменний– К.: ІНК ОС, 2005– 504 с.
7. Недужий І.А. Технічна термодинаміка та теплопередача / І.А. Недужий, О.М. Алабовський – К.: Вища шк., 1981.– 248 с.
8. Константинов С.М. Технічна термодинаміка / Константинов С.М. – К.: Політехніка, 2001, - 377с.
9. Зубарев В.М. Практикум по технической термодинамике / В. М. Зубарев, А.А. Александров, В.С. Охтин. – М.: Энергоатомиздат, 1986.– 304 с.
- 10.Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов: справочник / С.Л. Ривкин – [4-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 288 с.